

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 4 年 6 月 20 日現在

機関番号：82636

研究種目：若手研究

研究期間：2018～2021

課題番号：18K18376

研究課題名（和文）パルス電磁界を用いた体内小型医療デバイスの高精度位置推定システムに関する研究

研究課題名（英文）Research on Highly Accurate Position Estimation System of In-Body Small Medical Devices Using Electromagnetic Pulses

研究代表者

チャカロタイ ジェドヴィスノブ (Chakarothai, Jerdvisanop)

国立研究開発法人情報通信研究機構・電磁波研究所電磁波標準研究センター・主任研究員

研究者番号：30626883

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,100,000円

研究成果の概要（和文）：独自に開発した生体組織の複素誘電率の周波数分散特性を正確に考慮できる時間領域電磁界解析法を用いて、体内で伝搬する電磁界パルスの伝搬速度・波形ひずみ等を解析し、体内の小型デバイスの位置を高精度に推定できることを確認した。また、本手法を用いて人体近傍で用いることができる広帯域アンテナを新たに設計・製作し、実際に評価を行った。さらに、人体近傍アンテナから放射され、体内へ侵入する電磁界パルスのエネルギーが人体へ吸収される過程を時系列的に高精度で解析できる新たな手法を提案し、電磁界パルスに対する人体の安全性を考慮したシステム設計が行えるようにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本成果は、生体組織の分散特性を考慮できる広帯域電磁界解析手法を新たに提案して実際に実装した。この手法を用いることで、人体近傍・体内広帯域アンテナの設計や広帯域パルス電磁界に対する人体ばく露評価等のみならず、地中レーダの解析、パルスを用いた医療イメージング等への様々な応用が考えられる。また、広帯域パルス電磁界に対する人体の過渡的な吸収エネルギーを解析可能にすることで、広帯域パルス電磁界に対する人体の安全性評価を行うことにつながる。さらに、体内医療デバイス位置の高精度な推定アルゴリズムを確立することで、超高齢化社会における医療サービスを向上させることができることに大きな社会的意義がある。

研究成果の概要（英文）：We used our in-house developed time-domain electromagnetic (EM) analysis method, which can accurately take into account frequency dependency of complex permittivity of biological tissues, to determine EM pulse velocity propagating in a human body and evaluate its pulse waveform. By using these information, we can estimate position of small medical devices inside a human body. We design a broadband on-body antenna using the proposed method, fabricate the antenna and evaluate its performance. In addition, we propose a new method for the time-domain analyses of EM energy absorbed into a human body due to broadband pulse radiated from the on-body antenna. With the aid of our newly proposed method, mechanism of energy absorption due to EM pulses is clarified and we can design a system which assure human safety due to exposures to EM pulses.

研究分野：電磁界解析、アンテナ、環境電磁波工学、医用生体電磁気学

キーワード：電磁界パルス 時間領域有限差分法 周波数分散特性

## 1. 研究開始当初の背景

(1) 近年、医療・ヘルスケアの分野での情報技術を応用する医療 ICT が注目を集めている。医療 ICT を実現するための無線通信技術として人体周辺通信があり、その中で重要な応用例としてカプセル内視鏡や移動型マクロロボットによる局所的薬投与等があげられる。しかしながら、これらの医療デバイスが実際に体内でどの位置にあるのかを正確に知る必要がある。

(2) これまで磁場、電磁波、超音波等を利用した医療デバイスの位置推定法が提案されているが、カプセル内視鏡の人体内伝搬環境は自由空間中の伝搬環境とは特性が大きく異なり、かつ非常に複雑であるため、正確な位置推定が困難である。電波を利用した位置推定法には、統計的な確率モデルを用いて数値的に受信電力強度を求める手法が用いられている。しかしながら、患者それぞれの体内組織構造等の違いによって必ずしも確率モデルに当てはめることができないことが問題である。

## 2. 研究の目的

(1) 本研究では、体内の詳細な三次元組織構造を有する人体モデルを用い、生体組織の複素誘電率の周波数分散特性を正確に考慮できる高精度・高速化時間領域電磁界解析技術を組み合わせ、高精度な人体モデルを用いた電磁界解析技術により、体内医療デバイスの位置を推定できるアルゴリズムを新たに考案し、その妥当性を確認することを目的とする。

(2) 広帯域電磁界パルスに対する人体の安全性を評価できる方法を提案し、広帯域パルス電磁界を用いた体内小型医療デバイスの位置推定の精度を確保しつつ、人体の安全性を担保できる手法を開発する。

## 3. 研究の方法

(1) まず、外部からの電磁界が体内へどのように伝搬するのかを調べるために、広帯域パルス電磁界を高精度に解析でき、かつ生体組織の周波数分散特性を考慮できる時間領域電磁界解析法を新たに考案し、実装する。本研究では、周波数分散型時間領域有限差分法 (Frequency-Dependent Finite-Difference Time-Domain Method, (FD)<sup>2</sup>TD 法)を用いた[1]。生体組織をよく表せる Cole-Cole 分散式を計算アルゴリズムに組み込むために、高速逆ラプラス変換 (Fast Inverse Laplace Transform, FILT)及び Prony 法を適用する[2], [3]。FILT は周波数領域の Cole-Cole 分散式を時間領域のインパルス応答に変換するために用い、求めたインパルス応答の成分分析のために Prony 法を適用した。Prony 法はある有限時間を持つ波形の中に含まれる指数関数的に減衰する成分及び指数関数的に減衰しながら、正弦・余弦的に振動する成分に分けることができる。これらの成分は、 $z$  領域で容易に表現することができることから、 $z$  変換による FDTD 定式化を行うことで、Cole-Cole 分散式を考慮した電磁界解析が可能となる。

(2) 次に、実装した手法の妥当性を検証するために、生体組織からなる単層及び多層誘電体の解析を行い、Mie 理論による周波数領域・時間領域での解析解と比較することで、手法の妥当性を確認する。妥当性の確認後、人体近傍で使用可能な広帯域アンテナを設計し、実際に製作して動作の確認を行う。

(3) 体内デバイスの位置を検出するために、複数 (3 個以上の)の人体表面に設置された複数個の広帯域アンテナから放射されたパルス電磁界が人体外部から体内で合成され、ピークが現れるため、このピーク値 (Received Signal Strength Indicator, RSSI 値)を検知し、位置推定を行うアルゴリズムを用いる。このため、広帯域パルス電磁界に対する人体の安全性の観点から、人体に吸収される時間的な電磁エネルギーを求める必要がある。そこで、これまで提案した解析手法を拡張し、エネルギーの吸収量を計算できるよう、計算アルゴリズムを改良した。改良した解析法の妥当性を確認すると共に、人体頭部に入射したときの広帯域パルス電磁界による吸収エネルギー量を解析する。これにより、人体に対する安全性を確保しながら、体内デバイスの設計が可能となる。

(4) (2)で設計した広帯域アンテナから実際にファントム内での電磁界がどのように伝搬するのかを調べるために、300 MHz-3 GHz 及び 3-20 GHz 帯域を有する広帯域パルス信号を発生できるパルス発生器を製作し、出力波形を高速オシロスコープで計測し、アンテナから放射された際のファントム内の波形を電磁界解析及び光電界プローブによる計測の両手法から評価する。これにより設計したアンテナの動作を確認することができる。

(5) 高精細な人体モデルを用いた電磁界解析を行い、広帯域パルス電磁界の伝搬特性 (体内から体外へ、体外から体内へ)を求め、その伝搬速度や RSSI 値の減衰量などを調べる。これらのパラメータを用いて、体内の医療デバイスの位置を検出する計算アルゴリズムを考案し、アルゴリズムの妥当性を確認するとともに、検出位置の精度を求める。

## 4. 研究成果

(1) 生体組織を含めた広帯域パルス電磁界の解析が非常に困難である。これは、生体組織の電気特性をよく表せる Cole-Cole 分散式を時間領域解析法に高精度に組み込む方法が存在しなかった

からである。FDTD 法でよく使われている回帰的畳込(Recursive Convolution, RC)法や区線形形 RC 法(Piecewise Linear RC or PLRC)は Debye 分散に適用できるが、Cole-Cole 分散式に対しては、解析精度が低下する。そこで、本研究では、Cole-Cole 分散式に対して、FILT を適用し、時間領域のインパルス応答を求めた後、Prony 法を用いて成分分析することで、Cole-Cole 分散式を含めた様々な分散モデルに対して適用可能な高精度で広帯域電磁界を解析できる手法を考案した。具体的には、Cole-Cole 分散式のインパルス応答の成分分析後に、z 領域での比誘電率は次式によって表すことができる。

$$X(z) = \sum_{l=1}^{N_l} \frac{A_l}{1 - p_l z^{-1}} + \sum_{k=1}^{N_k} \frac{B_k - C_k z^{-1}}{1 - r_k z^{-1} + q_k z^{-2}} \quad (1)$$

ここで、 $N_l$  及び  $N_k$  は実数及び複素数の極の数である。 $A_l, p_l, B_k, C_k, r_k$  及び  $q_k$  は Prony 法により得られた係数(すべて実数)である。式(1)をマクスウェルの構成関係式に代入し、離散的な時間における電界を求めると、以下のような式が得られる。

$$E^n = \frac{1}{L_1} \left[ \frac{D^n}{\epsilon_0} - L_2 E^{n-1} - I^{n-1} - \sum_{l=1}^{N_l} p_l P_l^{n-1} - \sum_{k=1}^{N_k} r_k Q_k^{n-1} + \sum_{k=1}^{N_k} q_k Q_k^{n-2} \right] \quad (2)$$

ただし、

$$L_1 = \epsilon_{r\infty} + \frac{\sigma \Delta t}{2\epsilon_0} + \sum_{l=1}^{N_l} A_l + \sum_{k=1}^{N_k} B_k \quad (3)$$

$$L_2 = \frac{\sigma \Delta t}{2\epsilon_0} - \sum_{k=1}^{N_k} C_k \quad (4)$$

$$I^n = I^{n-1} + \frac{\sigma \Delta t}{2\epsilon_0} (E^n + E^{n-1}) \quad (5)$$

$$P_l^n = p_l P_l^{n-1} + A_l E^n \quad (6)$$

$$Q_k^n = r_k Q_k^{n-1} - q_k Q_k^{n-2} + B_k E^n - C_k E^{n-1} \quad (7)$$

$\epsilon_0, \epsilon_{r\infty}, \sigma$  及び  $\Delta t$  はそれぞれ真空の誘電率、無限の周波数における媒質の比誘電率、導電率及び計算時間ステップである。 $n$  は時間ステップインデックスである。本提案手法による解析結果が発散しないことを証明するために、z 変換による安定性解析を行ったと共に、1次元における様々な分散 (Debye, Cole-Cole, Davidson-Cole 及び Havriliak-Negami モデル) を有する媒質の反射係数を求めた。得られた結果と理論値と比較して、2%以内の誤差で理論値と非常によく一致しているため、手法の妥当性を確認した。これらの研究成果を IEEE 論文にまとめた[4]。また、本手法を用いた人体へのパルスばく露評価を行うことができることを示した[5][6]。

(2) 提案手法の妥当性を確認するために、直線偏波の平面波による誘電体球の散乱解析を行った。誘電体球の半径は 10 cm で、媒質は Cole-Cole モデルより一般化された Jonscher-Raicu モデルとした。解析モデルの解像度は 2 mm で、 $\Delta t = 3.85$  ps とした。解析領域の大きさは  $141 \times 141 \times 141$  セルである。領域外に向かって伝搬する電磁波を吸収するために、解析領域を取り囲むように 8 層の完全整合層を設ける。図 1 には、提案手法によって求めた誘電体の中心点から  $\pm 4$  cm 離れた位置における電界の時間波形及び Mie 理論による解析解を示しており、両者が非常によく一致していることから 3次元構造でも本手法を適用できることを確認した[7]。

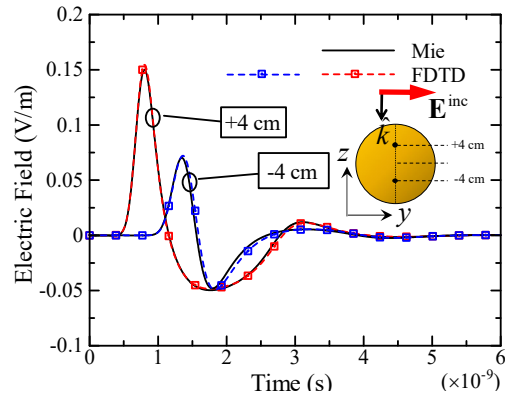


図1 誘電体球の中心から x 軸上-4 cm 及び+4cm 離れた点における電界波形の計算結果及び Mie 解析解[7]

次に、体内の小型医療デバイスの位置推定のために用いる人体外に設置される広帯域アンテナを設計する。設計目標は人体と接触している状態で、300 MHz～3 GHz の周波数帯で電圧定在波比 (VSWR) が 2 以下である。アンテナは大きさ  $0.03 \times 0.03 \text{ m}^2$  の 2 個の正方形金属パッチからなり、給電点を両パッチの中心に設けた。パッチの背後に大きさ  $b \times b = 0.1 \times 0.1 \text{ m}^2$ 、厚さ 6 mm の磁性材料であるフェライトを設置した。フェライトは特に低周波帯におけるアンテナ特性の改善及び高周波における放射電磁界の抑制のために用いる。フェライトと正方形パッチとの間の間隔は 2 mm とした。

まず、筋肉の誘電直方体ファントムの近傍に置かれたときの広帯域アンテナの反射係数を数値解析により求めた。図 2 に示すように、ファントムがない場合の共振周波数は 1 GHz 及び 2 GHz 付近である。帯域幅は 1 GHz において 28% で、比較的狭帯域である。一方、筋肉の誘電直方体から距離 2 mm 離れてアンテナを配置した場合の帯域幅は 121% である。近傍に配置されたファントムとの相互作用によって、共振周波数が低周波にシフトすると共に、広帯域において反射係数の特性が改善されたことが確認できる。また、誘電体と接触している場合 (距離 0 mm)、アンテナの帯域幅はさらに 164% に増大し、VSWR = 2 以下の周波数範囲は 297 MHz～3.04 GHz であり、設計目標(300 MHz～3 GHz)を満足していることを確認した。

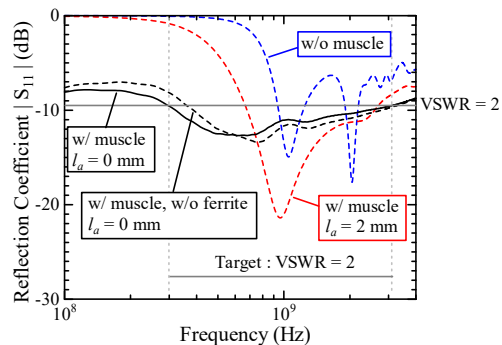


図 2 筋肉の誘電直方体近傍の広帯域アンテナの反射係数[7]

次に、人体近傍において広帯域アンテナの特性を評価した。設計した広帯域アンテナを人体の胸部(Case A)及び腹部(Case B)に配置した。アンテナの反射係数を数値シミュレーションにより求めた結果、設計した広帯域アンテナの反射係数は人体近傍の配置場所によって大きく変化し、設計された目標から外れることが分かった。特に胸部に配置した場合、VSWR が 2 以下の下限周波数が 594 MHz にシフトする結果となった。従って、この広帯域アンテナを安定的に動作させるためには、人体とアンテナとの間の整合層が必要であると考えられる。提案手法により、求めた心臓(Case A)及び小腸(Case B)内の電界波形を示す。アンテナからの距離は Case A の場合、5.8 cm で心臓壁内に観測点を設けたのに対して、Case B の場合の距離は 6.0 cm である。心臓内のパルス波形の幅は小腸内のそれよりも小さいことが見られる。このように、提案手法によって解剖学的人体モデル内における広帯域パルス電磁界の波形を正確に求めることが可能であることを示した。この結果から、広帯域パルス電磁界を用いた体内小型医療デバイスの位置検出等の応用に本提案手法を用いることができることを確認した。

図 3 に本研究で製作した広帯域アンテナ及び人体の各部位 (腕 Arm, 腹部 Stomach 及び手平 Palm) の近傍に置かれた場合の広帯域アンテナの反射係数を示す。設計では、300 MHz～3 GHz まで反射係数が -10 dB 以下であるが、実際の人体に置いた際の反射係数は大きく変動することを確認できた。これは解析モデル及び実際のモデルが異なるためである。特に製作した広帯域アンテナの給電点において、方形パッチにそれぞれ同軸の芯と外胴体に接続しており、非平衡給電であるため、反射特性が低周波領域で大きく変動する原因であると考えられる。

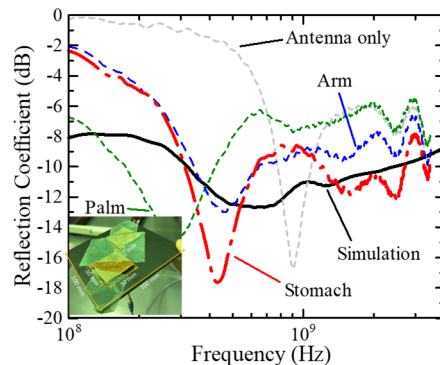


図 3 人体の各部位に置かれた広帯域アンテナの反射係数

(3) (2)では、提案手法により人体外部に設置したアンテナから放射された広帯域パルス電磁界が体内へ伝搬する際の時間波形を高精度に解析できることを示した。しかしながら、提案手法では、広帯域パルス電磁界の過渡的な吸収エネルギーを求めることができない問題がある。本研究で、広帯域パルス電磁界を用いた体内医療デバイスの位置に用いる計算アルゴリズムは、人体表面上に設置した複数の広帯域アンテナから放射され、合成された広帯域パルス電磁界による RSSI を用いるため、人体の安全性の観点から体内に吸収される過渡的なエネルギーを求める必要がある。そこで、Cole-Cole 分散モデルから複数項の Debye 分散へ変換するための Debye パラメータ抽出方法を新たに考案し、等価回路モデルにより人体への吸収エネルギー量を求める手法を新たに提案した。複数項の Debye 分散の定式化に関しては、これまでよく用いられる補助微分方程式 (Auxiliary Differential Equation, ADE)法 [8]を適用できる。この解析手法を用いて、(2)と同様に誘電体球の散乱解析を行い、解析解と非常によく一致していることから妥当性を確認できた。また人体頭部に対して、平面波が入射した際の頭の内部で吸収される過渡的なエネルギー量を求めることができた。これらの研究成果を IEICE の招待論文[9]にまとめた。これにより広帯域パルス電磁界に対する人体の安全性を確保しながら、体内医療デバイスの位置推定アルゴリズムの設計を行うことができる。

(4) 設計した広帯域アンテナから放射され、ファントム内に伝搬する広帯域パルス電磁界の波形を測定し、電磁界シミュレーションによる結果と比較する。本研究では、300–3 GHz 帯域では、Pico Technology 社製のパルス信号発生器 (Picosource PG911)を用いた。一方で、3–20 GHz 帯域では、GIT 社製の UWB インパルス発生器を用いた。図 4 に 40 GHz 帯高速オシロスコープによって計測したインパルス発生器からの出力電圧信号を示す。周波数スペクトルは約 8.5 GHz において -20.14 dBm で、3–20 GHz 帯域において、-50 dBm 以上であることを確認した。この波形データを提案した FDTD 法に組み込んで、液剤ファントム内で伝搬の様子を解析した。液剤ファントム内においてアンテナからの距離が離れるにつれ、パルス振幅が小さくなることが分かった。実際に、液剤ファントム内に特注で製作した光電界センサを用い、時間波形を観測した。距離減衰及びパルス振幅を比較したところ、距離減衰はおおむね一致したが、振幅は大きく異なる結果となった。これは、光電界センサの受信特性が影響していると考えられる。

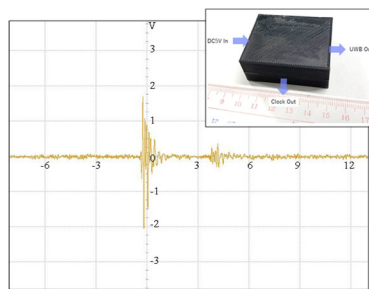


図 4 高速オシロスコープで観測したパルス波形

(5) 情報通信研究機構が開発した高精細の人体モデル(解像度 2 mm)から人体腹部の 2 次元断面を切り出して本研究で提案した FDTD 法による 2 次元の電磁界解析から、体内の点波源から放射された広帯域パルス電磁界が体の周辺に設けた複数の観測点に到達する時間を計算し、300 MHz – 3 GHz の周波数成分を含む広帯域パルス電磁界の伝搬速度及び減衰量を求めた。これらの情報から、点波源の位置を推定した結果、提案する位置推定アルゴリズムにより約 3 cm 以内の誤差で推定可能であることを確認した。今後、より詳細な 3 次元人体モデルや広帯域アンテナを含めた解析へ拡張すると共に、推定アルゴリズムの改良及び実際に評価システムに実装することが考えられる。

#### <引用文献>

- [1] K. S. Yee, “Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell’s equations in isotropic media,” IEEE Trans. Antennas Propag., vol. AP-14, no. 3, pp. 302–307, May 1966.
- [2] T. Hosono, “Numerical inversion of Laplace transform and some applications to wave optics,” Radio Sci., vol. 16, no. 6, pp. 1015–1019, Nov./Dec. 1981
- [3] R. Carriere, R. L. Moses, “High resolution radar target modeling using a modified Prony estimator,” IEEE Trans. Antennas Propag., vol. 40, no. 1, pp. 13-18, Jan. 1992.
- [4] J. Chakarothai, “Novel FDTD scheme for analysis of frequency-dependent medium using fast inverse Laplace transform and Prony’s method,” IEEE Trans. Antennas Propagat., vol. 67, no. 9, pp. 6076-6089, Sep. 2019.
- [5] J. Chakarothai, S. Watanabe, K. Wake, “Numerical dosimetry of electromagnetic pulse exposures using FDTD method,” IEEE Trans. Antennas Propagat., vol. 66, no. 10, pp. 5397-5408, Oct. 2018.
- [6] J. Chakarothai, K. Wake, K. Fujii, “Dosimetry of Various Human Bodies Exposed to Microwave Broadband Electromagnetic Pulses,” Frontiers in Public Health (Radiation and Health), 2021.
- [7] チャカロタイジェドヴィスノブ, 和氣加奈子, 渡辺聡一, 陳強, 澤谷邦男, “超広帯域電磁界解析のための周波数依存性 FDTD 法,” 電子情報通信学会 和文論文 C, vol. J102-C, no. 5, pp. 102-113, May 2019. (招待論文)
- [8] R. Pontalti, L. Cristoforetti, R. Antolini, and L. Cescatti, “A multirelaxation (FD)2-TD method for modeling dispersion in biological tissues,” IEEE Trans. Microw. Theory Techn., vol. 42, no. 3, pp. 526–528, Mar. 1994.
- [9] J. Chakarothai, K. Fujii, Y. Suzuki, J. Shibayama, K. Wake, “Analyses of Transient Energy Deposition in Biological Bodies Exposed to Electromagnetic Pulses Using Parameter Extraction Method” IEICE Transactions on Communications, Vol.E105-B, No.6, pp. 694-706, Jun. 2022. (Invited Paper)

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 6件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Chakarothai Jerdvisanop, Watanabe Soichi, Wake Kanako	4. 巻 66
2. 論文標題 Numerical Dosimetry of Electromagnetic Pulse Exposures Using FDTD Method	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Antennas and Propagation	6. 最初と最後の頁 5397 ~ 5408
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TAP.2018.2862344	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Chakarothai Jerdvisanop	4. 巻 67
2. 論文標題 Novel FDTD Scheme for Analysis of Frequency-Dependent Medium Using Fast Inverse Laplace Transform and Prony's Method	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Antennas and Propagation	6. 最初と最後の頁 1 ~ 1
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TAP.2018.2878077	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 チャカロタイジエドヴィスノブ、和氣加奈子、渡辺聡一、陳強、澤谷邦男	4. 巻 J102-C
2. 論文標題 超広帯域電磁界解析のための周波数依存性FDTD法	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 電子情報通信学会 和文論文C	6. 最初と最後の頁 102-113
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 小内利仁、チャカロタイジエドヴィスノブ、キックアルフレード、鈴木敬久、柴山純	4. 巻 J102-C
2. 論文標題 GPUを用いた超並列計算による高速逆ラプラス変換及びProny法を適用した周波数分散性FDTDスキームの高速化に関する検討	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 電子情報通信学会 和文論文C	6. 最初と最後の頁 156-160
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Chakarothai Jerdvisanop, Wake Kanako, Fujii Katsumi	4. 巻 9
2. 論文標題 Dosimetry of Various Human Bodies Exposed to Microwave Broadband Electromagnetic Pulses	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Frontiers in Public Health	6. 最初と最後の頁 1-13
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3389/fpubh.2021.725310	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 CHAKAROTHAI Jerdvisanop, FUJII Katsumi, SUZUKI Yukihisa, SHIBAYAMA Jun, WAKE Kanako	4. 巻 E105.B
2. 論文標題 Analyses of Transient Energy Deposition in Biological Bodies Exposed to Electromagnetic Pulses Using Parameter Extraction Method	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEICE Transactions on Communications	6. 最初と最後の頁 694 ~ 706
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1587/transcom.20211SI0003	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計13件 (うち招待講演 3件 / うち国際学会 5件)

1. 発表者名 Jerdvisanop Chakarothai, Katsumi Fujii
2. 発表標題 Retrieval of Debye Parameters from Cole-Cole Model for Broadband FDTD Analyses
3. 学会等名 2020 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 チャカロタイジエドヴィスノブ, 藤井勝巳
2. 発表標題 高速逆ラプラス変換とProny法を適用した広帯域時間領域電磁界解析及びその応用
3. 学会等名 電子情報通信学会ソサイエティ大会 (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 鈴木敬久, 小内利仁, 柴山純, チャカロタイジェドヴィスノブ
2. 発表標題 FILT及びProny法を用いた(FD)2TDスキームの並列化とパフォーマンス評価
3. 学会等名 電子情報通信学会ソサイエティ大会 (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 チャカロタイ ジェドヴィスノブ
2. 発表標題 超広帯域FDTD法による人体近傍アンテナ設計
3. 学会等名 電子情報通信学会 アンテナ・伝搬研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 チャカロタイ ジェドヴィスノブ、藤井 勝巳
2. 発表標題 Cole-Coleモデルに対するデバイパラメータの抽出
3. 学会等名 電子情報通信学会ソサイエティ大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Jerdvisanop Chakarothai, Katsumi Fujii
2. 発表標題 A Unified Approach for Treatment of Frequency-Dependent Materials in FDTD Method
3. 学会等名 2019 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP) (国際学会)
4. 発表年 2019年



1. 発表者名 Jerdvisanop Chakarothai
2. 発表標題 General Treatment of Material Dispersion in Time-Domain Simulations
3. 学会等名 Kolloquium der Abteilung 7 Temperatur und Synchrotronstrahlung at PTB, Germany
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Jerdvisanop Chakarothai
2. 発表標題 An (FD)2TD approach for ultra-wideband analyses including biological bodies
3. 学会等名 2019 Asia Pacific Radio Science Conference (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Toshihito Onai, Alfred Kik, Jerdvisanop Chakarothai, Yukihisa Suzuki, Jun Shibayama
2. 発表標題 Performance comparison between different schemes of the frequency dispersive FDTD under the GPU implementation
3. 学会等名 Progress in Electromagnetics Symposium (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 チャカロタイジエドヴィスノプ、和氣加奈子、渡辺聡一
2. 発表標題 超広帯域パルス電磁界に対する人体ばく露評価
3. 学会等名 電子情報通信学会 エレクトロニクスシミュレーション研究会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 小内利仁, チャカロタイジェドヴィスノブ, キックアルフレード, 鈴木敬久, 柴山純
2. 発表標題 高速逆ラプラス変換及びProny法を適用した周波数分散性FDTDアルゴリズムの並列化に関する検討
3. 学会等名 電子情報通信学会ソサイエティ大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 チャカロタイ ジェドヴィスノブ
2. 発表標題 FDTD法を用いた広帯域パルス電磁界の数値ドシメトリ
3. 学会等名 東北大学 第601回伝送工学研究会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Jerdvisanop Chakarothai, Kanako Wake, Katsumi Fujii
2. 発表標題 FDTD Analyses of Anatomical Human Bodies Exposed to Broadband Electromagnetic Pulses
3. 学会等名 BioEM 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>電子情報通信学会「エレクトロニクスソサイエティ招待論文賞」を受賞  <a href="https://rri.nict.go.jp/news/20201027_award.html">https://rri.nict.go.jp/news/20201027_award.html</a>          2020 ISAP Best Paper Award  <a href="https://aer.nict.go.jp/news/20210330_award.html">https://aer.nict.go.jp/news/20210330_award.html</a></p>
---

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------